

Innovación en las técnicas de microscopía óptica aplicadas a la industria minera

Pérez-Barnuevo, L., Brea, C., Castroviejo, R.

Universidad Politécnica de Madrid

laura.perez.barnuevo@upm.es;

caro8000@hotmail.com;

ricardo.castroviejo@upm.es.

RESUMEN

En la actualidad está plenamente reconocida la importancia de la caracterización mineralógica en el ámbito de la minería. Su aplicación es fundamental no sólo durante la etapa de diseño del circuito de concentración mineral, sino que se extiende también al control de calidad de los concentrados, al ajuste del circuito frente a variaciones de composición a medida que avanza la extracción en la mina, e incluso a la prevención de contaminación medioambiental.

Tradicionalmente, el mineralogista se ha apoyado en el microscopio óptico y el contador de puntos para llevar a cabo la caracterización mineralógica. Sin embargo, una industria minera cada vez más exigente junto con la paulatina desaparición de expertos mineralogistas ha contribuido en gran medida al desarrollo de nuevas técnicas de análisis y a la evolución de las ya existentes. A menudo estas técnicas se apoyan en instrumentos costosos y de difícil mantenimiento (como el microscopio electrónico de barrido y la tecnología QEMSCAN), solo al alcance de grandes compañías mineras. Por todo ello, parece evidente que es necesaria una técnica que pueda realizar una caracterización mineral completa de manera más fiable y rápida que los métodos tradicionales, pero con un coste al alcance de la pequeña y mediana industria minera. El proyecto CAMEVA demuestra que esto es posible mediante un sistema automatizado de caracterización mineral basado en el análisis digital de imagen aplicado a la microscopía óptica de reflexión.

ABSTRACT

Applied mineralogy has become an essential tool for mining and metallurgical engineering. Mineralogical characterization is important not only for the design of the circuit, but also for the quality control of the concentrates, for the adjustment of the circuit when compositional variations appear in the mine, and also to prevent pollution of the environment.

Traditionally, mineralogical characterization has been done by a mineralogist working with optical microscope and a point counter device. But a very demanding mining industry in addition with the fact that qualified observers have become a rarity, have led to the development of new techniques. Usually these techniques are based on very expensive instruments with very high maintenance costs which only large

corporations can afford (e.g. scanning electron microscope and QEMSCAN technology). All these reasons make necessary the development of a technique that could carry out a more reliable, rapid and performant mineralogical characterization than manual methods, but accessible for small and medium mining companies. The CAMEVA project makes it possible through an automatic system for mineralogical characterization based on digital image analysis applied to reflected light microscopy.

INTRODUCCIÓN

El microscopio de polarización ha sido y sigue siendo considerado por muchos como la herramienta más importante y más ampliamente utilizada en el análisis mineralógico y petrológico de todos los tiempos (Jones, 1987, Craig & Vaughan, 1994, Criddle, 1998). Las primeras observaciones al microscopio fueron realizadas hace más de 300 años. Sin embargo, la primera aplicación del microscopio de luz polarizada de la que se tiene constancia se produjo en 1861 en el estudio de metales y meteoritos por parte de Sorby. Desde ese momento, el uso del microscopio de reflexión con luz polarizada comenzó a extenderse rápidamente entre los mineralogistas y petrólogos de la época, propiciando la posibilidad de investigación microscópica de forma sistemática e impulsando de manera indiscutible el desarrollo de la microscopía de menas. Comienzan a surgir entonces importantes trabajos de identificación mineral mediante el microscopio óptico como los realizados por Könisberger (1910) y Schneiderhöhn (1922), aunque sin duda, la obra desarrollada por Ramdohr a partir de 1932 (Ramdohr, 1980) es la descripción más completa de minerales opacos que se ha realizado hasta nuestros días.

Gracias al gran desarrollo experimentado por la microscopía de menas y al potencial del microscopio óptico como herramienta de estudio mineralógico, a principios del siglo XX comienzan a aparecer los primeros estudios mineralógicos aplicados a la metalurgia. Esta nueva aplicación del microscopio óptico se ve impulsada además por el desarrollo de la flotación selectiva (Schwartz, 1938). En efecto, tanto la identificación de las especies minerales que entran en el proceso de flotación como la relación textural entre ellas son parámetros clave en el control de la molienda y en la selección de los reactivos de flotación. La microscopía óptica ofrecía entonces información sobre las propiedades mineralógicas y geométricas de la mena que a través de un análisis químico no podría obtenerse. Mientras el análisis químico aportaba información cuantitativa más precisa (por ejemplo acerca de la cantidad de metal perdido en los rechazos) era el análisis al microscopio óptico el que determinaba por qué razón se producía esta pérdida (Amstutz, 1962).

De esta manera, el estudio de láminas delgadas y probetas pulidas al microscopio óptico de reflexión se convirtió en una poderosa herramienta en el planteamiento y solución de problemas relacionados con la concentración mineral. Sin embargo, la respuesta a cuestiones como: ¿cuáles son los minerales que tienen valor?, ¿qué minerales se encuentran asociados con los minerales de mena?, ¿cuál es la relación textural existente entre mineral y ganga?, etc. no es suficiente para la industria minera, sino que toda esta información debe ser expresada en términos cuantitativos.

El ingeniero de minas y el metalurgista esperan del estudio mineralógico, no sólo la identificación de los minerales de mena y ganga, sino también la abundancia relativa de cada uno de los minerales identificados. Además, tal estudio mineralógico debe tratar de predecir cuál será el comportamiento de estos minerales durante los procesos de concentración mineral, para lo cual es necesaria la descripción cuantitativa de la textura mineral, entendiendo como tal las relaciones geométricas y espaciales entre los constituyentes minerales.

Para tratar de cubrir esta demanda de información cuantitativa comienzan a desarrollarse técnicas de análisis de imagen basadas en estereología. Surge así el primer contador de puntos (Thompson, 1931; Glagolev, 1933; Chayes, 1956), que durante buena parte del siglo pasado fue la única herramienta de la que disponía el mineralogista para recabar algunos de los datos requeridos por el metalurgista. A partir de los años 60, gracias a los grandes avances experimentados en los sistemas de televisión comienzan a desarrollarse sistemas de análisis digital de imagen capaces de realizar medidas y cálculos que requerían horas con el contador de puntos, en cuestión de minutos. En la actualidad, el análisis digital de imagen se erige como la técnica que mejor se adapta a los requerimientos de la industria minera, ya que es capaz de obtener gran cantidad de información con una rapidez y una fiabilidad que se encuentran fuera del alcance del contador de puntos.

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA EN PROCESOS DE CONCENTRACIÓN

En la actualidad está plenamente reconocida la importancia del conocimiento mineralógico de la mena a la hora de definir el proceso de concentración mineral. Sin embargo, la aplicación de los estudios de caracterización mineralógica no debe limitarse exclusivamente a la etapa del diseño del proceso de tratamiento, sino que tal estudio debe ser realizado en cualquier etapa de la operación, ya que permite ejercer cierto control sobre el rendimiento de los procesos de concentración: bien como modo de comprobación periódica de la efectividad de la recuperación, bien como control de calidad de los concentrados.

Por otro lado, dado que la composición mineralógica de la mena puede cambiar a medida que avanza la extracción en la mina, estos análisis aportan la información necesaria para realizar los ajustes oportunos en el proceso de molienda y demás procesos de concentración (Cameron, 1961).

Pero la mineralogía no sólo es útil en la identificación de los minerales valiosos y en la definición y control del método de concentración, sino que también puede y debe ser aplicada para anticiparse a una posible afección medioambiental. Agarwal *et al.* (1976) fueron pioneros en el empleo de la petrografía de procesos no sólo en la resolución de cuestiones técnicas propias del tratamiento del mineral, sino también en la identificación de elementos traza que puedan ser perjudiciales para el medio ambiente, en la caracterización de la naturaleza física y química del residuo generado en el proceso de concentración mineral y en la determinación de aquellos minerales de ganga que puedan reaccionar en el proceso hidrometalúrgico y conllevar el consumo excesivo de reactivos ácidos.

¿Cuáles son los parámetros mineralógicos capaces de caracterizar tanto el mineral bruto, como los concentrados y los residuos del proceso de concentración? De una forma simplificada se puede decir que los principales parámetros mineralógicos que deben ser analizados para conseguir tal caracterización son, por un lado, la identificación de las especies minerales presentes y su cuantificación o análisis modal y por otro lado, es fundamental la determinación del grado de liberación mineral para lo que se hace indispensable el estudio de las texturas minerales.

Identificación mineral y análisis modal

La caracterización mineral debe comenzar con la identificación de las especies minerales presentes en la muestra estudiada. Tal y como resaltaron autores como Schwartz (1938) y Ramdohr (1980), la identificación precisa de los minerales de mena es fundamental a la hora de establecer el proceso de tratamiento y concentración mineral.

En primer lugar, la determinación cualitativa de los minerales permite establecer cuáles son los minerales portadores de los metales valiosos en los minerales de mena. Esta primera identificación es primordial para definir el tipo de tratamiento que se dará a la mena. En segundo lugar, es necesario identificar cuáles son los minerales de ganga, bien por su posible potencial económico, o bien por su posible influencia en el proceso de tratamiento, como en el caso de la presencia de cuarzo asociado con galena, que puede conllevar una sobremolienda causada por la diferencia de la dureza entre el mineral de mena y el mineral de ganga.

Por otro lado, este análisis cualitativo también debe alertar sobre la presencia de aquellos minerales que puedan resultar perjudiciales en los procesos de concentración. Por ejemplo, la presencia de sulfuros de hierro, estibnita o sulfuros de cobre (como calcosina) en menas de oro tratadas mediante cianuración es tremendamente perjudicial, ya que estos minerales reaccionan con la solución cianurada produciendo un consumo excesivo del reactivo y la contaminación del concentrado. Por lo tanto, el análisis mineralógico debe ser lo más completo y preciso posible, y debe incluir incluso aquellos minerales que están presentes en pequeñas cantidades.

Una vez identificadas las especies minerales debe llevarse a cabo un estudio de cuantificación o análisis modal que exprese en datos porcentuales la abundancia relativa de cada uno de los minerales presentes. Es conveniente realizar este análisis modal tanto en el mineral bruto, como a su salida de la trituración y en cada una de las etapas del proceso de concentración. Tradicionalmente, estos estudios de cuantificación se han llevado a cabo de forma manual mediante contador de puntos o platina integradora, pero en la actualidad existen otras alternativas basadas en el análisis digital de imagen que permiten llevar a cabo un trabajo de cuantificación más rápido y fiable gracias a la automatización del proceso.

Grado de Liberación

Las partículas minerales pueden estar constituidas por un único mineral, en cuyo caso son consideradas partículas liberadas, o pueden estar formadas por dos o más minerales, en cuyo caso se denominan partículas mixtas.

Uno de los datos que mayor relevancia tiene a la hora de definir la posibilidad de beneficio de una mena es su grado de liberación y éste se define como el cociente entre la cantidad de dicho mineral que se encuentra en partículas liberadas dividido entre la cantidad de mineral total, contenido tanto en partículas liberadas como en partículas mixtas Gaudin (1932).

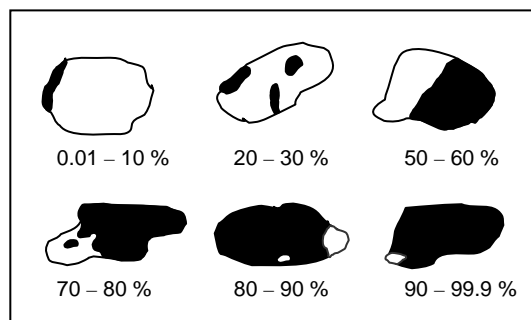


Figura 1: clasificación de las partículas mixtas según su contenido de mineral en estudio.

El análisis detallado del grado de liberación de un determinado mineral suele expresarse en función de la distribución de este mineral en las partículas mixtas. Para ello se establecen clases de partículas según la cantidad porcentual de dicho mineral que contienen (Fig. 1), desde partículas que contienen un 0.01 % hasta las que están formadas en su totalidad por este mineral (100 %, aparentemente liberadas) con incremento del 10 % en cada clase (Petruk, 2000).

De esta manera se puede calcular la cantidad de mineral que se encuentra en partículas liberadas (clase 100), qué cantidad se encuentra en partículas que contienen entre un 80 % y un 90 % del mineral (clase 80 – 90) y así sucesivamente hasta la clase 0.01 – 10, que representa a las partículas con menor grado de liberación. Estos datos se suelen representar en forma de curvas de liberación (Miller *et al.*, 1982) (Fig.2).

La observación de probetas pulidas mediante microscopio óptico puede ser suficiente para determinar si la mayoría de las partículas se encuentran liberadas o no, pero cuando se trata de realizar una interpretación más detallada del grado de liberación es necesario recurrir al análisis de imagen. Este recurso se hace imprescindible cuando la cantidad de partículas mixtas es elevada, ya que en ese caso es necesario conocer las causas por las cuáles el mineral de mena no está liberado. Es aquí donde entran en juego algunos aspectos texturales como el tamaño de grano, la naturaleza de los bordes de intercrecimiento y el tipo de intercrecimiento entre los minerales adyacentes que forman parte de las partículas mixtas. El estudio de estas características texturales es fundamental a la hora de establecer la posibilidad de liberación de un determinado mineral y por lo tanto, el éxito o el fracaso de su concentración.

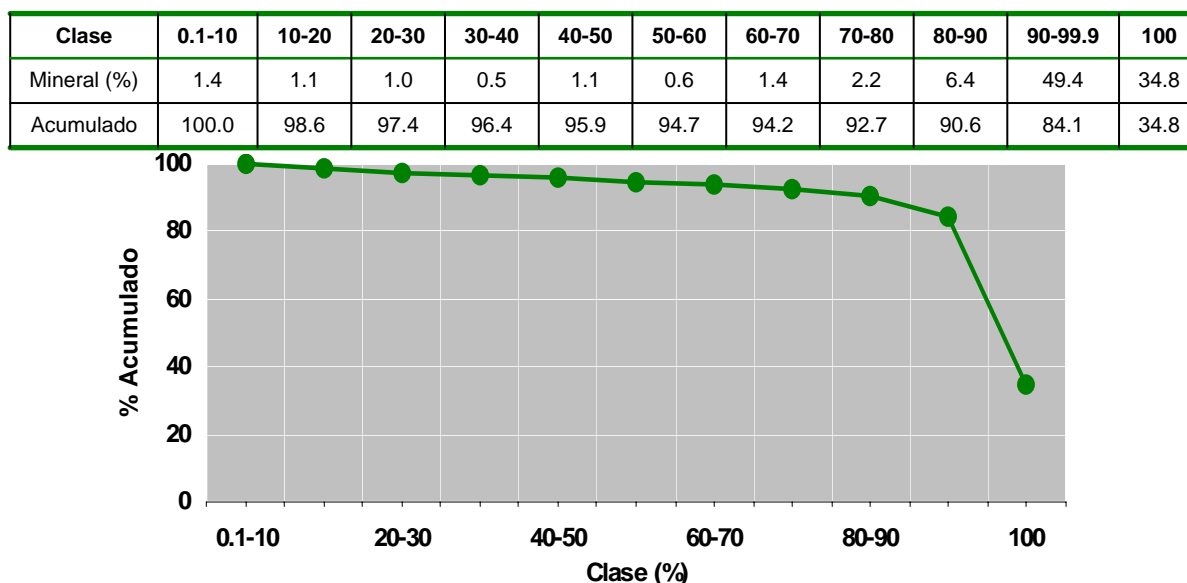


Figura 2: curvas de liberación basadas en el análisis de las partículas según al cantidad de mineral en estudio que contienen.

Textura mineral

En este trabajo, al hablar de textura mineral se hará referencia a la clasificación que Ramdohr (1980) define como “clasificación textural técnica”. Esta clasificación textural es aquella que, junto con la identificación de las diferentes especies minerales, responde a cuestiones relacionadas con el comportamiento de los minerales durante los procesos de concentración mineral. En este sentido, describe la textura mineral como el conjunto de rasgos minerales que mayor influencia tienen sobre la liberación mineral, que son fundamentalmente tres:

- Tamaño de grano
- Tipo de borde de unión entre minerales adyacentes
- Tipo de intercrecimiento mineral

Tamaño de grano

La caracterización granulométrica de las partículas minerales es necesaria tanto para determinar si los minerales se encuentran dentro del rango de tamaño requerido por el propio proceso de tratamiento, como para establecer el grado de liberación mineral y predecir el grado de molienda necesario para conseguir la liberación de un determinado mineral (Petruk, 2000). Se trata, por lo tanto, de un parámetro que debe ser expresado en términos cuantitativos y no puramente descriptivos.

Un escaso conocimiento de este factor puede llevar a producir una molienda excesiva e innecesaria y con ella unos costes que podrían haber sido evitados, mientras que una molienda insuficiente conducirá hacia una mala liberación y producción de gran cantidad de mixtos, con el riesgo de sobremolienda que ello conlleva. Por lo tanto, se trata de un parámetro clave no solo en el control de la liberación, sino también en el control de los costes de operación.

Tipo de borde de unión entre minerales adyacentes

Freund (1966) define este parámetro como la fuerza con la que dos granos minerales se encuentran unidos, que en términos mineralúrgicos se puede expresar como la resistencia que un agregado de minerales opone a su separación en los minerales que lo constituyen a lo largo del borde de unión entre ellos. Este poder de resistencia es, además, una medida de la posibilidad de conminución. Sin embargo, se trata de un parámetro difícil de cuantificar y como norma general se considera que si dos granos minerales se encuentran unidos mediante bordes de unión simples y suavizados, serán fácilmente liberados durante el proceso de trituración y molienda (aunque hay excepciones, como en el caso de la figura 3, donde se observa una imagen de un concentrado y en su parte central un grano compuesto por pirita y galena; en este caso, a pesar de la suavidad de los bordes de contacto entre ambos minerales, la rotura está gobernada por el clivaje de la galena). Por el contrario, en aquellos casos en los que los minerales se encuentren finamente intercrecidos será muy difícil conseguir una liberación completa, a no ser que se lleve a cabo una molienda excesivamente fina.

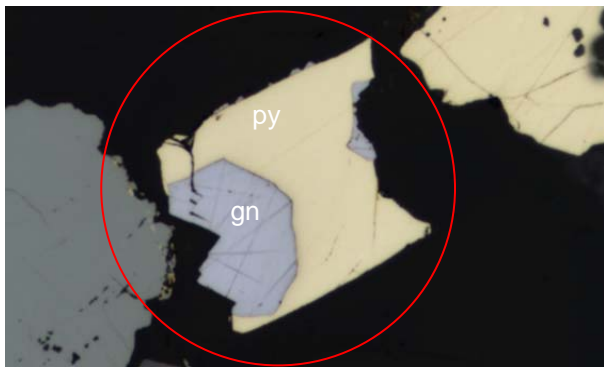


Figura 3: partícula mixta compuesta por pirita y galena en la que no ha sido posible la separación de los minerales por el borde de contacto entre ambos debido a que prevalece el clivaje de la galena.

Tipo de intercrecimiento mineral

El tipo de intercrecimiento existente entre los minerales que constituyen una partícula mixta tiene especial relevancia a la hora de determinar tanto la posibilidad de liberación, como la posibilidad de concentración de las fases minerales constituyentes. Precisamente bajo ese enfoque Gaudin (1939) realiza una clasificación simplificada de las partículas mixtas binarias en función del tipo de intercrecimiento mineral y de su comportamiento en los procesos de concentración (Fig. 4)

Mientras que el comportamiento de las partículas minerales caracterizadas por intercrecimientos del tipo I y II es el esperado en función de la abundancia relativa de las fases constituyentes, no ocurre lo mismo con los tipos de intercrecimientos que Gaudin incluye en los grupos III y IV. En estos casos, la caracterización de estas partículas como “no liberadas” no es suficiente, ya que se pueden estar produciendo fuertes pérdidas del mineral encapsulado, que además pueden ir acompañadas de una contaminación inevitable del concentrado.

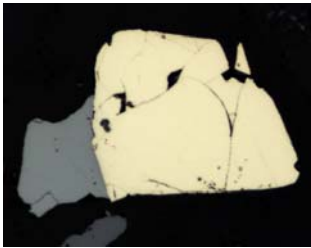
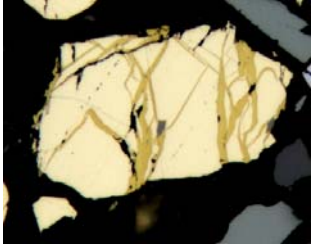
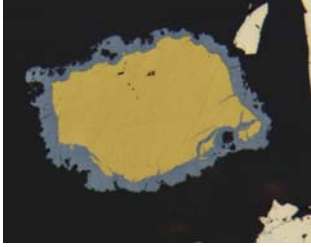
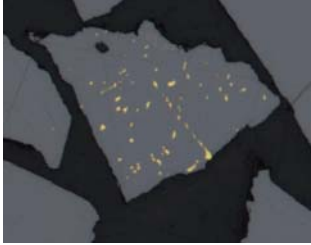
TIPO DE INTERCRECIMIENTO	COMPORTAMIENTO ESPERADO
 <p><u>TIPO I.</u> Intercrecimiento simple. Los minerales adyacentes se encuentran unidos mediante bordes rectilíneos o suavemente curvados.</p>	<p>La composición superficial de estas partículas es proporcional a su composición volumétrica, de manera que durante la flotación se comportan de acuerdo con dicha composición. Fácil liberación.</p>
 <p><u>TIPO II.</u> Intercrecimiento vetilla o sándwich. Una de las fases minerales se encuentra incluida en la otra en forma de vetilla.</p>	<p>La respuesta a la flotación está directamente relacionada con la abundancia relativa de cada una de las fases, mientras que la liberación es posible pero más difícil que en las partículas del tipo I.</p>
 <p><u>TIPO III.</u> Intercrecimiento corona o recubrimiento. Una de las fases se encuentra cubriendo, si no totalmente, al menos parcialmente a la otra fase.</p>	<p>No responde a la flotación tal y como cabría esperar por la abundancia relativa de las fases, sino que se comporta según las propiedades del mineral de recubrimiento. Liberación completa imposible por medios físicos.</p>
 <p><u>TIPO IV.</u> Intercrecimiento emulsión o diseminado. Una de las fases se encuentra en forma de minúsculas inclusiones en la otra fase.</p>	<p>Responde a la flotación tal y como cabría esperar para la fase más abundante. Liberación imposible.</p>

Figura 4: clasificación de los intercrecimientos minerales con mayor influencia en los procesos de concentración minerales según Gaudin (1939).

En la actualidad, aspectos como la identificación y análisis modal de los minerales constituyentes, el tamaño de grano de los mismos y el cálculo de su grado de liberación están plenamente resueltos mediante técnicas de análisis de imagen, pero no así las cuestiones relativas al tipo de intercrecimiento existente entre las diferentes fases minerales que constituyen la mena. Hoy en día es posible predecir cuál será la liberación de un determinado mineral, e incluso el tamaño de molienda necesario para obtener dicho grado de liberación gracias al desarrollo de modelos de predicción de la liberación basados en el análisis digital de imagen (King, 1979; Finch and Petruk, 1984; Petruk *et al*, 1986; Lin *et al*, 1987). Pero una industria minera cada vez más exigente requiere ir más allá del cálculo de la liberación para tratar de conocer y expresar en términos cuantitativos la causa por la que un determinado mineral no está liberado. En ese sentido, el estudio (tanto cualitativo como cuantitativo) de los intercrecimientos de los minerales que constituyen la mena

puede aportar gran cantidad de información para mejorar el grado de recuperación mineral y, por lo tanto, incrementar el beneficio de la mina.

ANÁLISIS DE IMAGEN. MÉTODOS MANUALES Y MÉTODOS AUTOMÁTICOS.

El fundamento de los sistemas de análisis de imagen se encuentra en la estereología, que no es más que la interpretación de estructuras tridimensionales a partir de secciones en dos dimensiones de estas estructuras (Underwood, 1970). En el caso que nos ocupa, la interpretación de las propiedades minerales (estructuras tridimensionales) se realiza bien de forma manual mediante la observación al microscopio óptico de probetas pulidas o delgadas, o bien de forma automática sobre imágenes digitales de estas secciones creadas a partir tanto de microscopio óptico como de microscopio electrónico de barrido. En ambos casos, el éxito o el fracaso del análisis de imagen radican en la capacidad de discriminación entre las diferentes fases minerales, requisito fundamental sin el que ningún sistema de análisis de imagen puede ofrecer datos certeros.

En el caso de los métodos manuales la herramienta en la que se apoya el mineralogista para recabar información cuantitativa es el contador de puntos o platina integradora, mientras que la responsabilidad de la discriminación recae sobre el mineralogista y éste debe contar con una dilatada experiencia, no sólo para garantizar la veracidad de los resultados, sino también para agilizar el proceso de análisis.

Por su parte, los sistemas de análisis de imagen automático se apoyan en potentes programas informáticos de análisis digital de imágenes creadas bien a partir de microscopio óptico, en cuyo caso la discriminación mineral se basa en la diferencia de reflectancia espectral que presentan los minerales, o bien a partir de microscopio electrónico de barrido, caso en el que los minerales se discriminan entre sí a partir de su composición química. Por supuesto, estos sistemas automáticos tienen limitaciones como la imposibilidad de discriminación entre minerales con similares valores de reflectancia en el primero (ej.: esfalerita y hübnerita. Castroviejo *et al.*, 2009); o la imposibilidad de distinción entre minerales polimorfos en el segundo caso (ej.: pirita y marcasita). Por ello, a pesar de que los sistemas automáticos son prácticamente autónomos, siempre es necesaria cierta supervisión.

El análisis digital de imagen basado en microscopio óptico ha sido empleado por varios grupos de trabajo en todo el mundo, principalmente en aplicaciones específicas de mineralogía simple. Sin embargo, algunos autores señalan sus limitaciones en el caso de mineralogías complejas (Sutherland *et al.*, 1991) y su uso fue disminuyendo a partir del año 1985 (Henley, 1989) a favor de los métodos de análisis de imagen basados en microscopía electrónica de barrido. Tanto es así, que en la actualidad la mayoría de los grupos de investigación dedicados a la mineralogía de procesos emplean el microscopio electrónico de barrido como instrumento para crear las imágenes de minerales a partir de las que se realizará el análisis mineralógico (Gottlieb *et al.*, 2000, Lastra *et al.*, 1998). Por lo tanto, no es de extrañar que los mayores avances en cuanto a tecnología de análisis mineralógico mediante imágenes digitales se hayan producido en el campo de la microscopía electrónica. En este campo destacan especialmente dos equipos de análisis:

- Sistema QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning electron microscopy*) desarrollado por la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)* de Australia y comercializado por Intellection Pty Ltd.
- Sistema MLA (*Mineral Liberation Analyzer*) creado por el *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKRMC)* en la Universidad de Queensland, Australia y comercializado por FEI Company.

A pesar de que queda fuera del alcance de este trabajo la descripción de estas tecnologías, merece la pena destacar que aunque estos equipos han demostrado ser tremendamente versátiles y potentes en cuanto a la obtención y análisis de la información mineralógica, tienen la limitación de que no siempre operan con la rapidez que requiere la industria, ya que la creación de las imágenes de alta resolución bien a través de la señal BSE (*Backscattered electrons*) o bien mediante EDS (*Energy Dispersive X-ray Analyser*) consume mucho tiempo. Por otro lado, uno de los grandes inconvenientes de estos equipos es su elevado precio de adquisición y su costoso mantenimiento, características que los convierte en inaccesibles para la pequeña y mediana industria minera, e incluso para centros de investigación y laboratorios de países en vías de desarrollo. Es en estos casos en los que el análisis de imagen basado en microscopía óptica supone una alternativa capaz de realizar un estudio mineralógico más completo que el que puede realizarse con el contador de puntos y tan fiable como el ofrecido por los sistemas QEMSCAN y MLA, pero con un coste asequible para aquellas empresas que no pueden permitirse el microscopio electrónico.

Procede pues preguntarse si existe la posibilidad de crear un sistema de análisis de imagen basado en microscopía óptica capaz de trabajar de manera automatizada, con absoluta garantía de fiabilidad de los datos obtenidos. Los últimos avances registrados en este campo indican que la respuesta a esta cuestión es afirmativa. Por lo tanto, parece interesante hacer un repaso de la evolución experimentada en la mineralogía aplicada basada en microscopía óptica desde la aparición del contador de puntos hasta los sistemas automatizados de análisis de imagen.

Primeros intentos de cuantificación. Aparición del Contador de puntos

Desde que se producen los primeros intentos de cuantificación mineral mediante microscopio óptico hasta la aparición del contador de puntos o platina integradora transcurren varias décadas, durante las cuáles se producen avances lentos pero fundamentales para el posterior desarrollo del análisis de imagen actual (Fig. 5).

La primera técnica de cuantificación mineral de la que se tiene constancia fue la desarrollada por De Lesse *et al.* en 1848. Este mineralogista francés, a partir de una sección de roca cortada al azar estableció la equivalencia entre la proporción volumétrica de los minerales constituyentes de la roca y la proporción del área que cada uno de estos minerales ocupaba en tal sección. Se trataba de una técnica tediosa cuya implementación requería demasiado tiempo, por lo que no gozó de gran éxito entre los geólogos y mineralogistas de la época. Sin embargo, constituye la primera relación de estereología cuantitativa: $V_V = A_A$.

Medio siglo más tarde el geólogo alemán Rosiwal (1898) desarrolló un método para obtener las proporciones volumétricas de los minerales a través de líneas en vez de áreas. Aparece así la segunda relación estereológica: $A_A = L_L$. Partiendo de esta relación, ya en el siglo XX Shand, 1916 acopla el micrómetro a la platina del microscopio, lo que permitió que la técnica de Rosiwal comenzara a aplicarse con frecuencia en las observaciones al microscopio.

La máxima simplificación en la cuantificación mineral llegó en los años 30 gracias a los trabajos de Thomson (1931) y Glagolev (1933). Ambos, trabajando de manera independiente establecieron la tercera relación estereológica, que no es más que la equivalencia entre la proporción volumétrica de una fase mineral y la proporción del número de nodos de una malla de muestreo superpuesta sobre la probeta que caen en dicha fase en relación con el número de nodos total de la malla de muestreo: $A_A = P_P$.

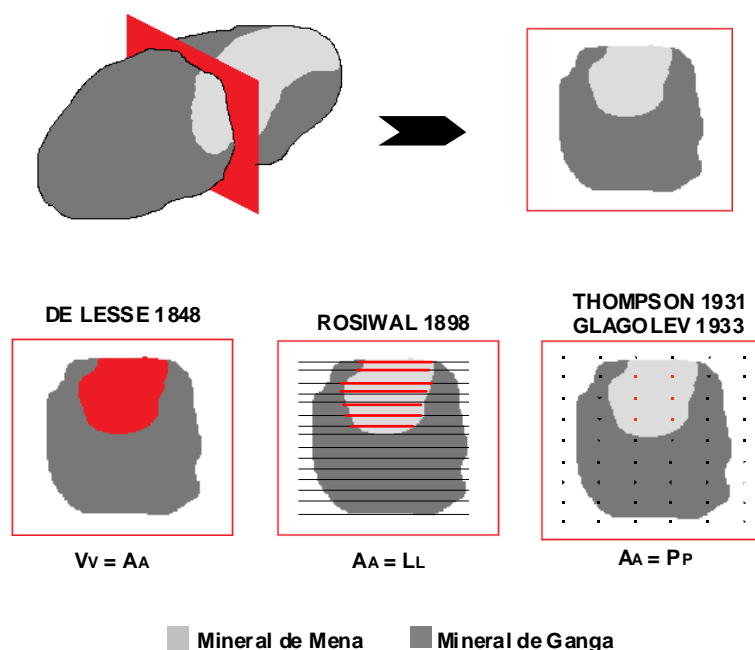


Figura 5: Evolución en los métodos de cuantificación volumétrica a partir de áreas, líneas y puntos.

Partiendo de esta última equivalencia Glagolev (1933) publica una descripción de lo que parece ser el primer contador de puntos electromecánico aplicado a la petrografía. En este aparato existe una conexión entre la caja de contaje y el carrito portador de la muestra, de manera que cuando se identifica el mineral situado bajo el nodo correspondiente de la malla de muestreo y se presiona la tecla asignada a dicha especie mineral, automáticamente el carrito porta-muestras se traslada al siguiente nodo y añade un recuento al mineral identificado bajo el nodo. Este instrumento nunca llegó a ser comercializado y es Chayes en 1949 quién pone en el mercado el primer contador de puntos (Chayes, 1956).

A partir de ese momento, el contador de puntos acoplado al microscopio óptico (Fig. 6) se convierte en una herramienta imprescindible en la mineralogía aplicada, e incluso hoy en día sigue siendo utilizado en algunos laboratorios que no pueden acceder a sistemas más caros. Sin embargo, este instrumento es lento para los requerimientos de la industria y su fiabilidad está sujeta al nivel de experiencia del mineralogista que los emplea, e inevitablemente al error cometido a causa de la fatiga humana.

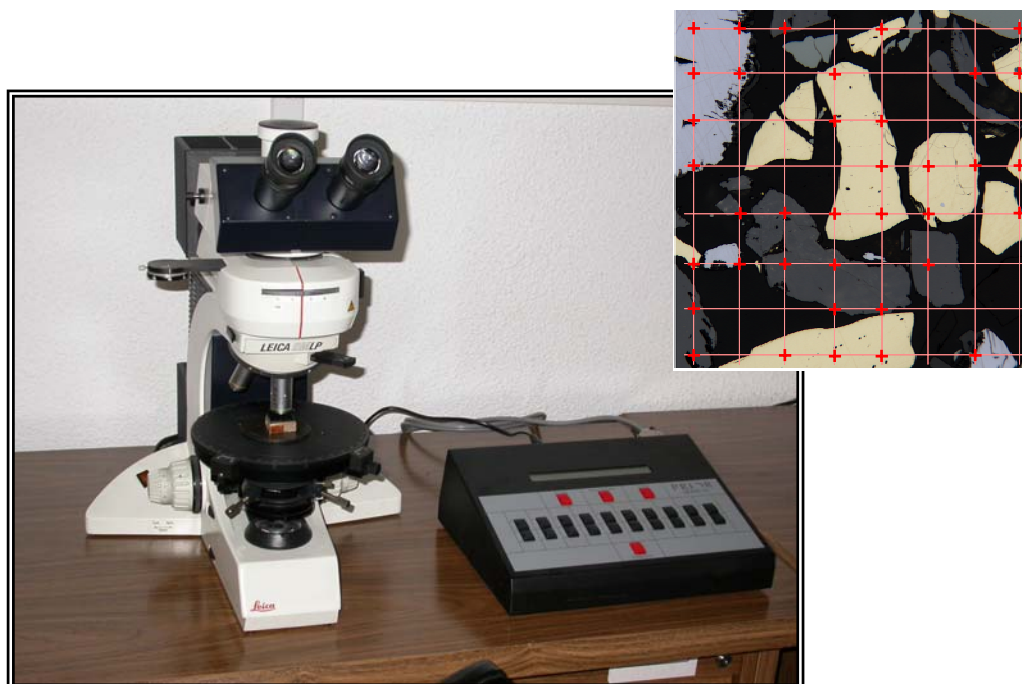


Figura 6: Contador de puntos acoplado a microscopio óptico

Análisis Digital de Imagen

A partir de los años 60, gracias a los grandes avances experimentados tanto en los sistemas de televisión como en el campo de la morfología matemática, e impulsados por la necesidad de información mineralógica más precisa y variada, comienzan a desarrollarse sistemas de análisis digital de imagen capaces de realizar medidas y cálculos de manera más rápida y fiable que con el contador de puntos. A lo largo de esta década comienzan a comercializarse los primeros analizadores de imagen y ya en la década de los 70 existen varias casas fabricantes de este tipo de sistemas. Precisamente durante los años 70 se produce un hito fundamental para el desarrollo de esta técnica: la introducción de los ordenadores como un elemento más en los sistemas de análisis de imagen. Este hecho propicia la aplicación de esta técnica en un amplio abanico de procesos industriales, así como en medicina y biología. Sin embargo, el verdadero desarrollo del análisis de imagen se produce en los años 90 gracias a la gran mejora en la fabricación de ordenadores y al desarrollo de potentes programas informáticos que permiten la obtención y el tratamiento de un gran volumen de datos. En los últimos 20 años el análisis de imagen se ha desarrollado espectacularmente, dando lugar a un gran número de programas comerciales de

análisis de imagen y a una bibliografía extensa al respecto, destacando las obras de Russ (1990 y 1991) y González & Woods (1993).

¿Qué es el análisis digital de imagen?

Es la ciencia experimental que mediante el tratamiento de imagen identifica, cuantifica y caracteriza elementos dentro de imágenes digitalizadas o digitales. Se trata de una ciencia multidisciplinar, ya que se apoya en otras técnicas o ciencias como la óptica, la estadística, matemáticas, informática, etc.

La base de esta técnica es una imagen que puede considerarse como un objeto plano cuya intensidad luminosa y color pueden variar de un punto a otro. Desde el punto de vista físico, una imagen monocroma puede considerarse como una función continua $f(x,y)$ cuyo valor representa el nivel de gris o brillantez en cada punto (x,y) . Para que esta función continua pueda ser tratada por el ordenador debe ser discretizada mediante un proceso llamado digitalización.

La digitalización, por tanto, consiste en la descomposición de la imagen original en una matriz de $M \times N$ puntos, cuyos índices de fila y columna identifican un punto de la imagen y el valor correspondiente a ese elemento de la matriz es proporcional a su luminosidad o nivel de gris. Cada uno de los elementos en que es posible dividir la imagen se denominan píxel (*Picture element*). La cantidad y tamaño de los píxeles, es decir, el número de niveles de gris y el tamaño de la matriz, condicionan la capacidad de resolución de la imagen digital. Generalmente, se trabaja con imágenes cuya resolución es de 256 valores de luminosidad o niveles de gris. Esto es mucho más de lo que el ojo humano puede distinguir en una imagen monocroma (20-30 como mucho), y sobrepasa con creces lo que puede contener una impresión fotográfica.

Russ (1990) describe el proceso de análisis digital de imagen como una secuencia de varias etapas que comienzan con la adquisición de la imagen y su digitalización y finalizan con la obtención de los datos deseados (Fig. 7).

Una vez adquirida y digitalizada, la imagen se almacena en la memoria del ordenador como una imagen en niveles de gris y a partir de ahí comienza su procesamiento. En primer lugar es necesario realizar una clasificación o discriminación de la fase cuyos rasgos morfológicos se quieren obtener; de este proceso resulta una imagen binaria en la que los píxeles solo pueden tener dos valores: 1 para aquellos píxeles correspondientes a la fase en estudio y 0 para los píxeles restantes. A partir de esta imagen binaria se lleva a cabo la segmentación, etapa en la que se separan cada uno de los objetos presentes en la imagen (partículas minerales) para, posteriormente, medir sus parámetros morfológicos característicos (área, perímetro, dimensión máxima y dimensión mínima, etc.). Tras la interpretación estereológica de estos parámetros y su análisis estadístico se obtiene gran cantidad de información.

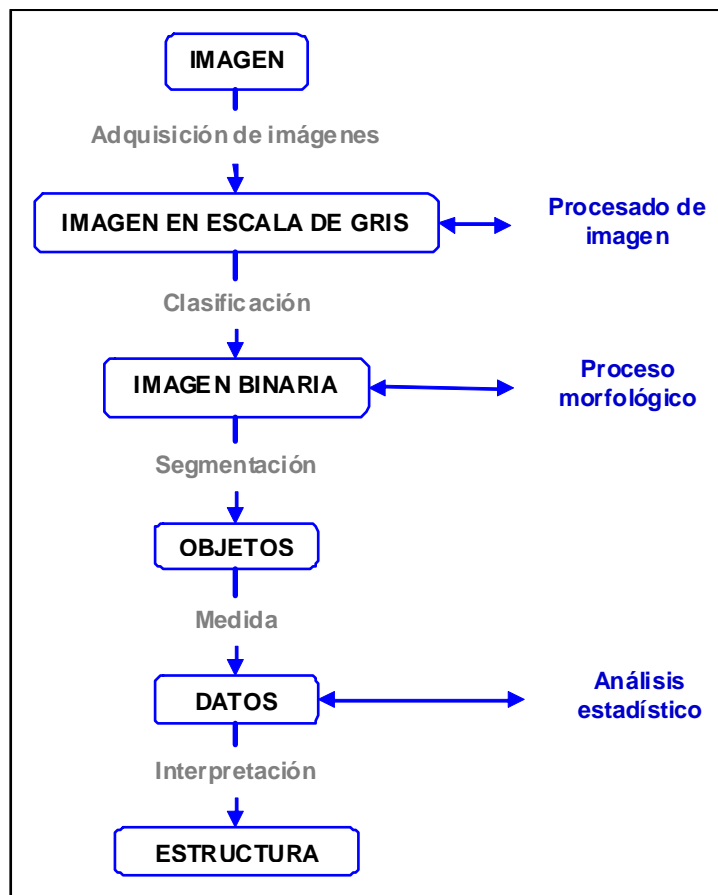


Figura 7: Etapas del proceso de análisis digital de imagen (Russ, 1990).

Análisis Digital de Imagen basado en microscopía óptica

Como se vio anteriormente, el éxito del Análisis Digital de Imagen radica en la posibilidad de discriminación entre los diferentes minerales, pero ¿qué propiedad mineral puede introducirse en la automatización para hacer posible tal discriminación? Al emplear el método manual el mineralogista puede recurrir a las propiedades de polarización relacionadas con la anisotropía de los minerales y observar no sólo una sino varias propiedades minerales (color, pleocroismo, anisotropismo, dureza, etc.). Sin embargo, la automatización del proceso exige trabajar en condiciones de aparente isotropía, es decir, recurriendo a propiedades que no dependan de la orientación (Castroviejo *et al.*, 2008).

Al trabajar con microscopio de luz reflejada es posible cuantificar un parámetro que, en condiciones de isotropía, no depende de la orientación del mineral. Se trata de la reflectancia, que no es más que el cociente entre la intensidad de la luz reflejada por una superficie pulida y la intensidad de la luz incidente. Cada mineral presenta diferentes valores de este parámetro en función de la longitud de onda de la luz incidente, de manera que se puede obtener una curva espectral característica de cada mineral en función de las diferentes longitudes de onda de la luz incidente. En la actualidad existe una excelente base de datos de reflectancia de prácticamente todas las menas metálicas y minerales absorbentes para todo el espectro visible (Criddle & Stanley, 1993). Se trata de tablas internacionalmente validadas por la

Commission of Ore Mineralogy de la International Mineralogical Association (COM/IMA).

Por otro lado, es necesario resaltar que una de las etapas fundamentales en el proceso de análisis de imagen es la preparación de las muestras, ya que si el pulido de las probetas no es suficientemente bueno, los minerales embutidos en la resina quedarán con relieve. En la imagen digitalizada este hecho se traduce en niveles de gris más bajos en el borde de los granos, llevando al sistema a identificar erróneamente estos bordes como un mineral diferente. Por lo tanto, a pesar de que estos equipos trabajan con un gran nivel de autonomía, antes de comenzar con el proceso de análisis digital de imagen es necesario realizar una observación al microscopio de las muestras a estudiar.

Sistema automatizado de análisis de imagen

Para que un sistema de análisis microscópico automatizado sea útil en aplicaciones industriales es necesario que sus resultados cumplan una serie de requisitos, entre los que destacan, además de la exactitud, la repetibilidad y la reproducibilidad. Es decir, el sistema debe garantizar la obtención de los mismos resultados a partir de una misma muestra, independientemente del operador, del equipo, y del lugar donde esté situado. (Catalina *et al.*, 2008). Para ello, es fundamental que la adquisición de la imagen se realice de una forma cuidadosa, es decir, corrigiendo las heterogeneidades en la respuesta del sistema completo, de manera que se pueda garantizar su estabilidad y la reproducibilidad de las medidas, así como la existencia de una relación lineal entre la reflectancia de los minerales y el nivel de gris característico que presenta cada mineral en la imagen (Pirard *et al.* 2000).

Siguiendo las instrucciones propuestas por Pirard *et al.* (1999) para conseguir un funcionamiento óptimo de la cámara CCD y establecer una metodología de trabajo que consiguiera la calibración del sistema completo, Berrezueta (2004), Berrezueta *et al.* (2007) lograron aplicar con éxito el análisis digital de imágenes de microscopio óptico capturadas con una cámara de video a color 3CCD. En este caso, el equipo de análisis digital de imagen estaba integrado por una cámara de video 3CCD acoplada a un microscopio de reflexión y conectada por tarjeta digitalizadora a un ordenador con programa de análisis digital de imagen. Mediante este trabajo se consiguió establecer una metodología de calibración del equipo de análisis de imagen, que permitió alcanzar las condiciones de estabilidad necesarias para obtener la correlación de los valores de reflectancia espectral de los minerales, valores publicados por Criddle & Stanley (1993), con sus respectivos niveles de gris obtenidos por análisis digital de imagen con una cámara de video a color. Como test adicional del método, un usuario sin experiencia previa logró poner a punto el equipo de análisis de imagen siguiendo la metodología propuesta por Berrezueta (2004), constatando de nuevo la relación lineal entre valores de reflectancia espectral de los minerales y sus niveles de gris característicos en la imagen a color (Pérez-Barnuevo, *et al.* 2008).

Sin embargo, a pesar de que el análisis de la mayoría de minerales de mena comunes puede hacerse mediante imágenes en color 3CCD, el uso de imágenes

multiespectrales es más fiable y tiene mayor potencial (Pirard *et al.* 2004) ya que reduce la posibilidad de confusión entre minerales con reflectancia similar.

Basándose en estas experiencias previas (Castroviejo *et al.* 2008) así como en la posibilidad de ampliar las bases de datos espectrales, como la QDF de Criddle & Stanley (1993), con datos de reflectancia mineral en el rango infrarrojo, se desarrolla el proyecto CAMEVA (Caracterización Automatizada de Menas metálicas mediante Visión Artificial). El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema automatizado capaz de llevar a cabo la identificación de los minerales presentes en muestras de menas metálicas para facilitar su posible aprovechamiento industrial. El desarrollo de este sistema, por lo tanto, podría cubrir las necesidades de un importante sector de la minería, que como se comentó anteriormente, no tiene la posibilidad de acceder a los equipos basados en microscopio electrónico.

PROYECTO CAMEVA

El proyecto ha sido desarrollado por el Grupo de Investigación Recursos Minerales de la Universidad Politécnica de Madrid (GIRMI_UPM), en el Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen (Red de Laboratorios de la Comunidad de Madrid, rla207) y por AITEMÍN con la colaboración de las Universidades del Ruhr-Bochum (Alemania) y Lieja (Bélgica). Este proyecto surge con el objeto de conseguir, en primer lugar, la identificación automática de menas metálicas mediante microscopio óptico de reflexión, a partir de preparaciones pulidas representativas. Se aspira, por otra parte, mediante la puesta a punto de esta metodología, a mitigar el problema que representa la paulatina desaparición de los expertos en microscopía de menas en todo el mundo (Castroviejo *et al.* 2008).

Una de las innovaciones que introduce el proyecto CAMEVA con respecto a la espectroscopía tradicional es la intercalación de una rueda de filtros monocromos entre la fuente luminosa y el microscopio. Las longitudes de onda de estos filtros están comprendidas entre 400 nm y 1000 nm, con espaciado de 50 nm, de manera que se hace posible la adquisición de imágenes multiespectrales no sólo del rango visible, sino también del rango infrarrojo. Esta ampliación del rango espectral permite que cada mineral quede caracterizado por 13 valores precisos de reflectancia, y no solo por los tres valores RGB empleados hasta ahora. El microscopio cuenta con un sistema de platina y enfoque motorizados, aumentando la precisión de las medidas y reduciendo considerablemente el tiempo de ejecución. Todo ello unido al bajo tiempo de toma de medidas (menor de 10 ms) reduce enormemente el tiempo de trabajo.

Instrumentación

La instrumentación utilizada (Fig. 8) comprende: un microscopio motorizado adaptado y con una rueda de filtros intercalada entre la fuente luminosa y el estativo; una cámara matricial monocroma, con salida digital; patrones alta y baja reflectancia, así como la imprescindible infraestructura de apoyo básico (equipamiento para pulido y control de calidad de muestras, eventual análisis de éstas por microsonda electrónica, fuentes de alimentación estabilizadas para el equipo de análisis de imagen) e informática (Castroviejo *et al.*, 2008).

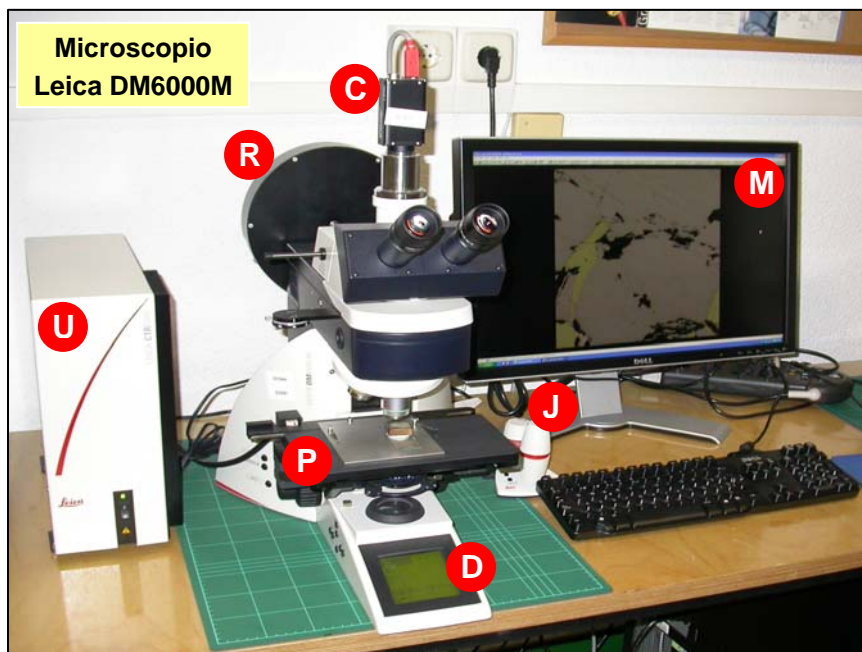


Figura 8: Microscopio motorizado adaptado para análisis de imagen, con: rueda de filtros (R), cámara digital B/N (C), monitor (M), mando automatizado (J), panel de control (D), platina automatizada XYZ (P) y unidad de control (U).

Desarrollo de un sistema de análisis microscópico automático

El desarrollo de este tipo de sistemas comprende dos actividades claramente diferenciadas (Catalina *et al.*, 2008):

- Adquisición de imágenes. Las imágenes de la cámara deben ser sometidas a un proceso de corrección, de forma que estén referidas a una escala absoluta y sean independientes del sistema con el que se hizo la adquisición.
- Desarrollo del programa de análisis propiamente dicho, que en algunos casos trata de reproducir el procedimiento del análisis manual seguido por los especialistas, pero que en otros casos debe ser desarrollado prácticamente desde cero.

Proceso de adquisición de imágenes

Las imágenes de la cámara deben ser corregidas para compensar el efecto de la falta de uniformidad de la iluminación, de los defectos del camino óptico, y de las diferencias de respuesta de los píxeles del sensor (Pirard, 1999). La calibración del equipo de análisis de imagen ha sido diseñada por AITEMIN, centro tecnológico con gran experiencia en el desarrollo de sistemas de análisis microscópico automatizado. El proceso de calibrado se realiza de forma automática al ejecutar un programa que desempeña las siguientes funciones (Catalina *et al.* 2008):

- Ajuste del tiempo de exposición de la cámara para cada una de las bandas de la imagen.
- Determinación de la disparidad del punto de enfoque óptimo entre las distintas bandas.

- Determinación de la variación del centro óptico y de la escala de la imagen entre las distintas bandas.
- Captura de imágenes de ambos patrones en cada una de las bandas para compensar la falta de uniformidad de la iluminación, el efecto del polvo y otras imperfecciones del sistema de adquisición, y establecer una correspondencia entre nivel de gris y reflectancia.

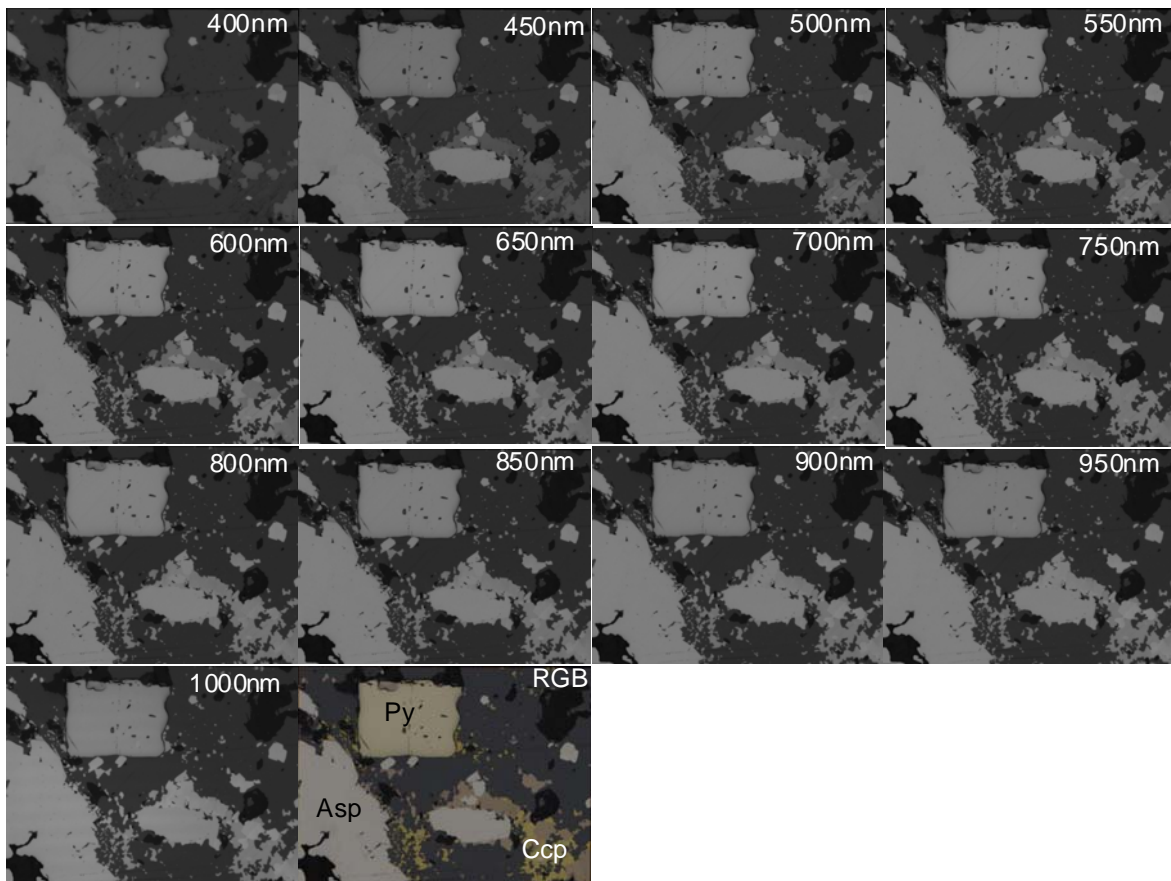


Figura 9: Composición de imágenes espectrales, desde 400 nm hasta 1000 nm. (Brea, 2009).

La adquisición de las imágenes multispectrales se lleva a cabo mediante una aplicación desarrollada por AITEMÍN. Con este programa se puede localizar y enfocar manualmente el sector seleccionado, aunque también ofrece la posibilidad de realizar un autoenfoco antes de la adquisición. La adquisición se realiza de forma automática y se guarda en paquetes de 13 imágenes, una por cada filtro desde 400 hasta 1000 nm con intervalos de 50 nm (Fig. 9) (Catalina *et al.*, 2008; Brea, 2009).

Programa de Análisis de Imagen

La consecución del sistema automatizado de caracterización mineral se apoya sobre dos pilares fundamentales: el primero es lograr la calibración del equipo de manera que las medidas realizadas sobre las imágenes de minerales adquiridas sean

representativas y reproducibles; el segundo pilar es la creación de una base de datos de reflectancia espectral que permita el reconocimiento automatizado de los minerales de mena.

La creación de esta base de datos se ha elaborado contando con los minerales de mena más comunes y con mayor importancia para la industria minera. En ese sentido, inicialmente se seleccionaron 30 minerales opacos, aunque en la actualidad la base de datos se ha incrementado hasta contener información espectral de más de 70 minerales. Tras la elección de los minerales se seleccionaron las probetas pulidas de los representativos. Este paso es fundamental ya que de la calidad de estas probetas dependerá la fiabilidad de los resultados obtenidos. Todas las probetas pulidas fueron estudiadas previamente, y en algunos casos, repulidas para conseguir una superficie de calidad óptima; del mismo modo, se recurrió al análisis por microsonda electrónica en aquellos casos que así lo requirieron. Finalmente, sólo se midieron los minerales representativos presentes en probetas pulidas con superficie limpia y con tamaño de grano suficientemente grande (Brea *et al.*, 2009).

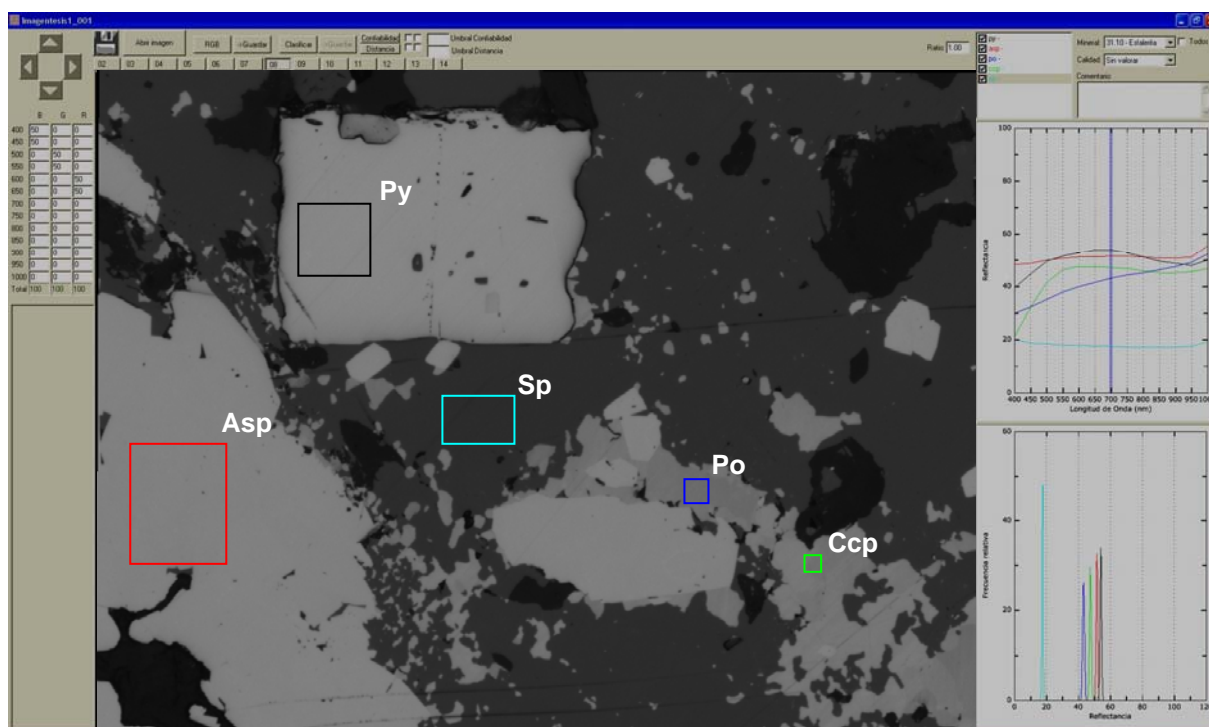


Figura 10: Aplicación del programa de análisis que permite extraer información espectral de cada mineral.

Dentro del programa desarrollado por AITEMÍN se encuentra una aplicación encargada de recoger los datos de reflectancia de las imágenes adquiridas. Esta aplicación muestra las imágenes en pantalla y permite al operador observar cada una de las bandas espectrales de manera individual o bien una imagen en falso color. El operador marca zonas rectangulares sobre los campos minerales para extraer sus espectros, que se muestran simultáneamente en una gráfica y se guardan en un archivo de datos para su posterior análisis. Este archivo contiene los

valores de reflectancia correspondientes a la moda y la desviación típica del histograma de cada una de las bandas, para cada zona marcada. Así, se puede generar una base de datos con la información espectral de cada especie mineral observada en las distintas muestras que será utilizada como referencia en un sistema de identificación automática de minerales (Catalina *et al.*, 2008; Brea, 2009). La figura 10 muestra la ventana de dicho programa tras la selección de cinco zonas en distintos minerales. En la parte derecha se pueden ver las curvas espectrales de cada una de las zonas así como sus histogramas en la banda espectral seleccionada (en este caso la correspondiente a 700 nm).

La validez de las curvas de reflectancia espectral obtenidas para cada uno de los minerales observados ha sido doblemente validada. Esta validación se ha llevado a cabo tanto por comparación con la base de datos QDF3 del IMA-COM (Criddle & Stanley, 1993), como mediante medidas obtenidas con un microfotómetro de reflexión espectral. Instrumento diseñado por el Dr. H.-J. Bernhardt (Universidad de Bochum, Alemania) y suficientemente contrastado como para ofrecer datos precisos y reproducibles en el rango de longitudes de onda entre 400 y 1000 nm, con una resolución espectral de 0,3 nm.

En la figura 11 se pueden observar las curvas espectrales características de algunos minerales obtenidas mediante el sistema de identificación automatizada. En este mismo gráfico se han trazado también los espectros dados por la QDF3 para esos mismos minerales, de manera que puede observarse que los valores de reflectancia obtenidos en el proyecto CAMEVA son muy similares a los reflejados por esta base de datos en cuanto al rango visible se refiere. Además, el proyecto CAMEVA aporta datos, hasta ahora inéditos, del comportamiento espectral de los minerales en el rango del infrarrojo cercano (Brea *et al.*, 2010). En muchos casos, los datos obtenidos en las longitudes de onda superiores a 700 nm eliminan la posibilidad de confusión entre minerales cuyas curvas espectrales en el visible son similares.

A partir de las medidas de reflectancia espectral de los minerales en 13 longitudes de onda diferentes ha sido posible desarrollar la aplicación de identificación mineral automatizada. Esta aplicación permite tanto identificar el mineral que se encuentra en una zona seleccionada por el usuario, como llevar a cabo la clasificación de la imagen completa. En el primer caso, el sistema sirve como “microsonda óptica” para realizar una identificación mineral rápida y eficaz. En el segundo caso, la imagen clasificada contiene toda la información necesaria para comenzar el análisis de imagen y la extracción de los datos necesarios para obtener la caracterización mineralógica. Esta aplicación contiene además una función fundamental en el caso del análisis mineralógico de probetas de concentrados minerales para su aplicación metalúrgica. Esta función permite adquirir imágenes sobre la superficie de la probeta dentro de un área definida por el usuario. El sistema puede realizar tanto un barrido total de esta área (lo cual permite crear un mosaico de imágenes), como un barrido siguiendo una malla de muestreo y adquiriendo un número determinado de imágenes en cada uno de los nodos de esta malla.

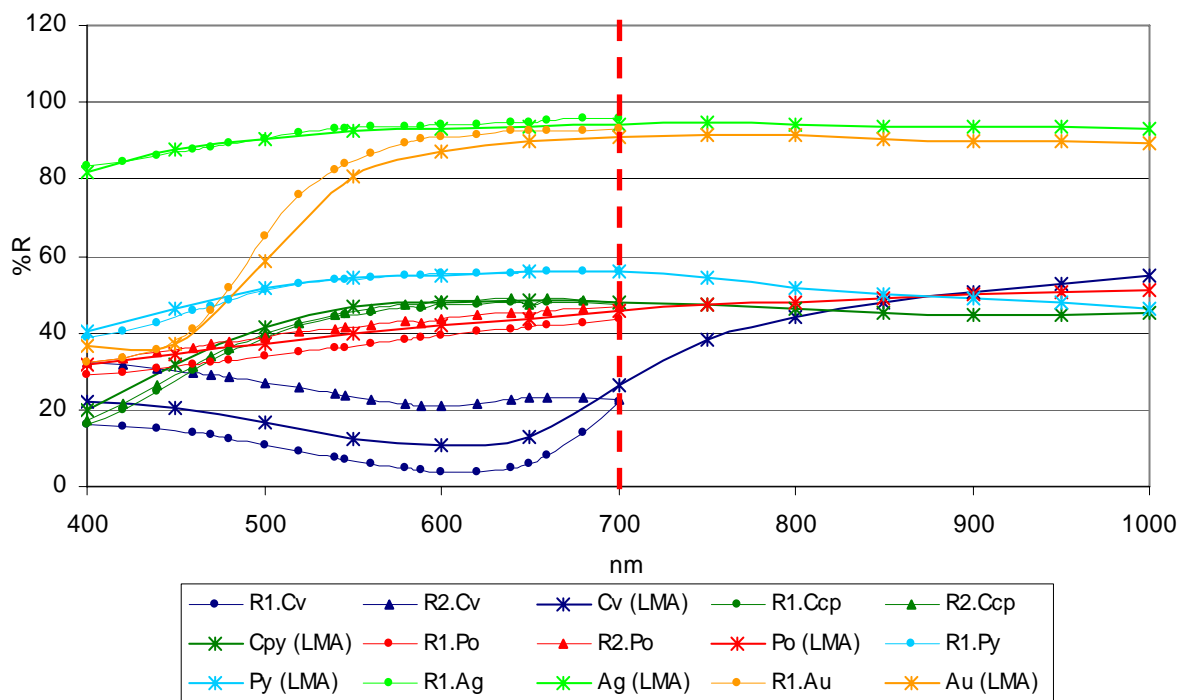


Figura 11: comparación entre las curvas espectrales obtenidas en el Laboratorio de Microscopia Aplicada (LMA) y las dadas por el QDF3 para los minerales: calcopirita (Ccp), Covellina (Cv), oro (Au), Pirita (Py), Pirrotina (Po), y plata (Ag).

Caracterización mineralógica mediante análisis digital de imagen

Este proceso comienza con la adquisición de imágenes de la superficie de la probeta pulida a analizar. Este proceso es totalmente automático, el usuario solamente debe seleccionar el área de la preparación sobre la que se efectuará el barrido, indicando el número de imágenes que quiere adquirir. Se ha comprobado que el número de imágenes necesarias para obtener resultados estadísticamente representativos debe ser como mínimo de 100 (Pérez-Barnuevo, 2008). Una vez que las imágenes han sido adquiridas se lleva a cabo la clasificación de las mismas para diferenciar las fases minerales del fondo (resina). Con esta imagen clasificada se obtienen tantas imágenes binarias como fases minerales coexisten y además una imagen binaria de cada una de las partículas minerales que se encuentran en la imagen. Estas imágenes binarias son procesadas mediante una macro que, a partir de operaciones de morfológica matemática, extrae los datos necesarios para la obtención de la abundancia relativa de cada mineral (análisis modal), su grado de liberación, o su caracterización morfológica. La macro está preparada para descargar los datos en una hoja de Excel diseñada previamente por el usuario.

En la figura 12 se puede observar un esquema del proceso de caracterización mineralógica mediante análisis digital de imagen.

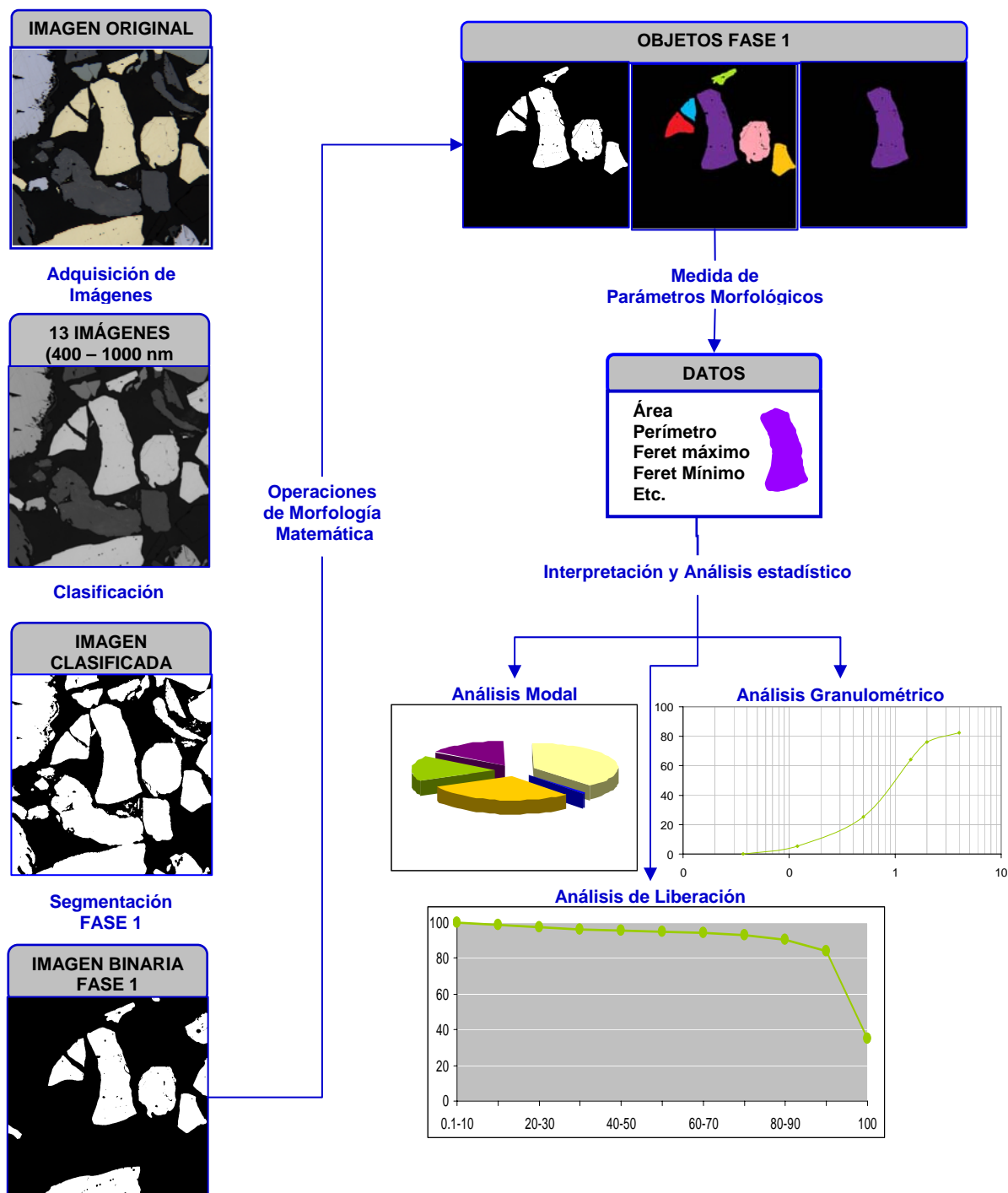


Figura 12: Caracterización mineralógica mediante análisis digital de imagen.

CONCLUSIONES

Tras haber realizado este análisis de los métodos de caracterización y cuantificación mineralógica basados en microscopía óptica parece evidente que existen grandes diferencias entre ellos. Estas diferencias son especialmente notables a la hora de evaluar sus respectivos rendimientos, tanto operacionales como económicos.

Mientras que el mineralogista puede trabajar como máximo 6 horas al día con un contador de puntos sin acusar una fatiga excesiva, un equipo automatizado puede trabajar las 24 horas del día y es capaz de procesar hasta 100 000 partículas minerales a la hora. Por su parte, el mineralogista podría procesar en el mejor de los casos 3 000 partículas, aunque si el tamaño de grano es muy pequeño o existen muchas partículas mixtas y de mineralogía compleja es posible que no supere las 300 partículas por hora. Este hecho sitúa el contador de puntos en una situación claramente desfavorable cuando la información a obtener es variable o compleja (Castroviejo *et al.*, 2002), y también cuando la cantidad de medidas a procesar es grande (por ejemplo, más de un millón de medidas a realizar: Coz *et al.*, 2003).

Pero quizá la diferencia más notable, que a su vez constituye la gran fortaleza del análisis de imagen frente al contador de puntos, es su gran versatilidad: una vez que la imagen ha sido adquirida puede ser procesada tantas veces como sea necesario para obtener información mineralógica de manera rápida, eficaz y precisa. Otro aspecto importante de este tipo de tecnología es que no requiere una gran inversión (como es el caso de equipos basados en microscopio electrónico); si bien es cierto que el coste de adquisición de un equipo de estas características (Fig.8) puede llegar a duplicar el coste de un equipo basado en contador de puntos, la recuperación de la inversión es más rápida, debido precisamente a que su rendimiento es mucho mayor (Pérez-Barnuevo *et al.*, 2010).

Se puede concluir, por lo tanto, que en el proyecto CAMEVA se encuentra la respuesta formulada al comienzo de este capítulo: la caracterización automatizada de minerales de mena mediante análisis digital de imágenes obtenidas a través de microscopio óptico es posible. Esta respuesta se encuentra avalada por un buen número de casos reales en los que se ha aplicado con éxito el análisis digital de imagen basado en microscopía óptica. Se trata de aplicaciones tan diversas como el análisis de áridos (García del Amo, 2000) o el de carbones (Coz y Castroviejo, 2002; Coz *et al.*, 2003). Pero sin duda, la principal aplicación de esta técnica se encuentra en el análisis de menas metálicas. En este campo se han realizado diversos estudios para diferentes minas ubicadas no solo en territorio español, sino también europeo y sudamericano. Se trata de análisis aplicados tanto en la fase de diseño de la planta de tratamiento (estableciendo el tamaño de molienda necesario para liberar el mineral de mena y obtener la mayor recuperación posible), como en el control del propio proceso de concentración. En este caso se han obtenido resultados interesantes que han contribuido a optimizar el circuito mediante el análisis de muestras tomadas en diferentes etapas del mismo y a controlar la calidad de los concentrados obtenidos. Por otro lado, se ha llevado a cabo un estudio comparativo de los resultados de cuantificación de tres muestras analizadas, primero por un mineralogista experto mediante contador de puntos y posteriormente, mediante análisis digital de imagen (tanto basado en imágenes RGB como en imágenes multiespectrales), obteniendo resultados con tendencias generales muy similares (Pérez-Barnuevo *et al.*, 2008); Pérez-Barnuevo *et al.*, 2010). Hecho que pone de manifiesto una vez más el gran potencial del análisis digital de imagen frente a los métodos tradicionales y alimenta el interés por continuar con el desarrollo de esta tecnología para convertirla en un instrumento accesible tanto para investigadores como para la propia industria minera.

REFERENCIAS

- Agarwal, J.C. et al** (1976). Process Petrography and Ore Deposits. The American Mining Congress. Reprinted from Mining Cong. Jour. 62(3): 28-35.
- Amstutz, G.C.** (1962). How Microscopy can increase recovery in your milling circuit. Miller Freeman Publications. Reprinted from Milling World 24:19-23.
- Berrezueta, E. y Castroviejo, R.** (2007) Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. I: ensayo metodológico. Rev. Metalurgia, 43 (4), 294-309.
- Berrezueta, E.** (2004) Caracterización de Menas Metálicas mediante Análisis Digital de Imagen: investigación de un sistema experto aplicable a problemas mineros. Tesis Doctoral (Dir. R. Castroviejo), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- Brea, C. et al.** (2010). "New data on the specular reflectance of ores (VNIR: 400 - 1000nm) and their significance for ore microscopy". Simposio Geo-metallurgy and Process Mineralogy. 20th General Meeting of the IMA. 210810-270810, Budapest (Hungría)
- Brea, C.** (2009). Aplicación del análisis multiespectral al reconocimiento automatizado de menas con microscopio de reflexión. Tesis de maestría. (Dir. R. Castroviejo), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas
- Cameron, E.N.** (1961). Ore Microscopy. Editorial John Wiley and sons, Inc. New York
- Catalina, J.C. et al** (2008). "Aplicación de la visión artificial al desarrollo de sistemas de Análisis microscópico automatizado". Simposio Avances recientes en Mineralogía aplicados a Geometalurgia. R3, XIII Congreso Latinoamericano de Geología Lima (Perú).
- Castroviejo, R. et al.** (2009). "Using Computer Vision for Microscopic Identification of Ores with Reflected Light: Preliminary Results". 10th Biennial Meeting of the SGA. Townsville (Australia)
- Castroviejo, R. et al.** (2008) Caracterización y Cuantificación automatizada de menas metálicas mediante Visión Artificial". Simposio Avances recientes en Mineralogía aplicados a Geometalurgia. R4, XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima (Perú).
- Castroviejo, R. et al.** (2002). Microscopic digital image analysis of gold ores: a critical test of methodology, comparing reflected light and electron microscopy. Minerals & Metallurgical Processing. Vol. 19 NO.2.
- Chayes, F.** (1956). Petrographic Modal Analysis. An elementary statistical appraisal. New York. John Wiley & Sons, Inc.
- Coz, E. et al.** (2003). Quantitative determination of modal content and morphological properties of coal sulphides by digital analysis as a tool to check their flotation behaviour. Elsevier.
- Coz, E. y Castroviejo, R.** (2002). Cuantificación automatizada del contenido de sulfuros en carbones por análisis digital de imagen, como ayuda para la previsión y corrección del impacto ambiental. XI Congreso internacional de la Industria, Minería y Metalurgia. Área II: Gestión y Aprovechamiento de Recursos Geológicos. Zaragoza (España). Pag. 79-81.
- Craig, J. & Vaughan, D.** (1994). Ore Microscopy & Ore Petrography. Editorial John Wiley and sons, Inc. Second Edition. New York – United States of America. 434.

- Criddle, A.J. & Stanley, C.** (1993). Quantitative Data File for Ore Minerals. Third Edition. Chapman & Hall British Museum, London. 635.
- Criddle, A.J.** (1998). Ore Microscopy and Photometry (1890 – 1998). COM / IMA. MAC Short Courses Series, Vol 27, Ottawa, Canadá.
- De Lesse, P. et al.** (1848) Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. Ann. Mines, (IV), Vol 13. 379.
- Finch, J.A. and Petruk, W.** (1984). Testing a solution to King Liberation Model. Int. Journal Mineral Processing, 12 300-311
- Freund, H.** (1966). Applied Ore Microscopy. Theory and Techniques. Macmillan. First English edition. Frankfurt – Germany.
- García del Amo, D.** (2000). Investigación y control mineralógico de la reacción árido-álcali para hormigón. Tesis Doctoral (Dir. R. Castroviejo), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 2 Volúmenes.
- Gaudin, A.M.** (1939). Principles of Mineral Dressing. McGraw-Hill, New York, pp. 554.
- Gaudin, A.M.** (1932). Flotation. McGraw-Hill, New York, pp.552.
- Glavolev, A.A.** (1933). On the geometrical methods of quantitative mineralogical analysis of rocks, Trans. Inst., Moscow, vol. 59.
- Gonzalez, R.C. & Woods, R.E.** (1993). Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company
- Gottlieb, P. et al.** (2000) Using Quantitative Electron Microscopy for Process Mineralogy Applications. *JOM*, April 2000.
- Henley, K.J.** (1989). Ore-dressing mineralogy update - a review of developments since ICAM 81, *MINPET 89 Mineralogy-Petrology Sym.*, Sydney, Aus. I.M.M. 61-75.
- Jones, M.P.** (1987). Applied Mineralogy. A Quantitative Approach. Graham and Trotman Ltd. London. UK. 259.
- King, R.P.** (1979). A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding. Int. Journal Mineral Process. Vol. 6, pp. 207-220
- Könisberger, J.** (1910) Methoden zur Erkennung und Messung optischer Anisotropie undurchsichtiger Substanzen. Centralbl. Min (1909 245-250; (1910) 712.
- Lastra, R. et al.** (1998). Image Analysis techniques and applications to mineral processing. In modern approaches to Ore and Environment Mineralogy, eds. L.J. Cabri and D.J. Vaughan, Mineral Assoc. Can., Short Course Vol. 27, pp. 327-366.
- Lin, C.L. et al.** (1987). An Evaluation of the multicomponent-multisize grinding liberation model using volumetric grade distribution, in process Mineralogy VII, eds. A.H. Vassiliou, D.M. Hausen and D.J.T. Carson, TMS, Warrendale, PA 589-601.
- Miller, P.R. et al** (1982). QEM*SEM Analysis of ore Minerals: Volume Fraction, Liberation, and Observational Variances. *Applied Mineralogy*. The Metallurgical Society of AIME, pp. 192-204.
- Pérez-Barnuevo, L. et al.** (2010) "A comparative study of quantitative methods in ore microscopy: Digital Image Analysis vs. Point Counter Device". Simposio Geometallurgy and Process mineralogy. 20th General Meeting of the IMA. Budapest (Hungria).
- Pérez-Barnuevo, L. et al.** (2008). "Ensayo metodológico para optimizar la caracterización mineralógica de menas metálicas. Estudio de un caso de aplicación geometalúrgica". Simposio Avances recientes en Mineralogía aplicados a

Geometalurgia. Ponencia R-5. XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima (Perú).

Pérez-Barnuevo, L. (2008). Ensayo metodológico para la caracterización automatizada de menas metálicas mediante análisis digital de imagen. Aplicación geometalúrgica. Tesis de maestría. (Dir. R. Castroviejo), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.

Petruk, W. (2000). Applied Mineralogy in the mining industry. First edition. ELSEVIER. Amsterdam, The Netherlands. 268.

Petruk, W. (1986). Predicting and Measuring Mineral Liberation in Ores and Mill Products, and effect of Mineral Liberation, in Process Mineralogy VI ed. D. Hagni, TMS, warrendale, PA 393-403

Pirard, E. et al. (1999). Optimal acquisition of video image in reflected light microscopy. European Microscopy and Analysis, 60, 9 – 11.

Pirard, E. et al. (2000) Segmentation of multispectral images in optical metallography. *Revue de Métallurgie – Sciences et Génie des Matériaux*, 219–227.

Pirard, E. (2004) Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy. *Mineralogical Mag.* 68 (2), p.323-333.

Ramdohr, P. (1980). The Ore Minerals and their Intergrowths, second Ed. Pergamon Press, Oxford.

Rosiwal, A. (1898). On Geometric Rock Analysis. A simple Surface Measurement to Determine the Quantitative Content of the Mineral Constituents of a Stony Aggregate. Verhandl K.K. geol. Reich. Wien. Vol. 5. 143.

Russ, J.C. (1990). Computer-Assisted Microscopy. The measurement and Analysis of Image. Plenum Press. New York, 450.

Russ, J.C. (1991). Practical Stereology. Second Edition. Plenum Press. New York, 307.

Schneiderhöhn, H. (1922). Antlietung zur mikroskopischen Bestimmung und Untersuchung von Erzen und Aufbereitungsprodukten besonders im auffallenden Licht. Selbstverlag der gesellschaft Deutscher Metalhütten und Bergleute e. V., Berlin (Germany), pp. 274.

Schwartz, G.M. (1938). Review of the application of microscopic study to metallurgical problems. Econ. Geol. Vol 33, pp. 440-453.

Shand, S.J. (1916). A recording micrometer for rock analysis. J. Geol., Vol. 24, pp. 394-403.

Sutherland, D.N. & Gottlieb, P. (1991). Application Of Automated Quantitative Mineralogy In Mineral Processing. *Minerals Engineering*, Vol. 4, Nos 7-11, pp. 753-762, 1991.

Thompson, E. (1930). Quantitative Microscopic Analysis. J. geology. Vol 27, 276 pp.

Underwood, E.E. (1970). Quantitative Stereology. London: Addison-Weslwy, 274 p.